

CARBONATACIÓN VS. ALUMINOSIS

Esta comunicación, que obtuvo el máximo reconocimiento en el área de “Materiales, sistemas y procesos constructivos” de CONTART 2008, aborda la carbonatación, un fenómeno natural que, de forma habitual, se da en los elementos estructurales de hormigón armado y que, en ocasiones, se considera normal por su escasa repercusión en la durabilidad de las estructuras.

texto_Francisco Javier Giner Juan (Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Málaga)

Si junto al concepto de carbonatación se introduce la palabra “aluminoso”, la valoración de degradación que se percibe por los efectos de la carbonatación adquiere otro cariz de tintes dramáticos. En este caso, la carbonatación deja de ser considerada un proceso natural algo habitual e indiferente.

CARBONATACIÓN DE CEMENTO PORTLAND

El proceso de carbonatación de un material resulta de una “incorporación extra” de carbono a su composición inicial. Esta relación del carbono con determinados componentes de los materiales dará lugar a ciertas reacciones químicas entre ellos, las cuales, consecuentemente, ocasionarán cambios en la estructura y propiedades del material en el que se producen. Tales cambios podrán suponer, o no, el inicio de un proceso patológico en el material afectado.

Al igual que la presencia de oxígeno es inevitable (al encontrarse este elemento en el aire que respiramos) y fundamental en los fenómenos de oxidación, el carbono de la atmósfera –en forma de gas anhídrido carbónico (CO_2)– favorecerá los fenómenos de carbonatación, máxime en zonas urbanas o con altos índices de polución donde las concentraciones de CO_2 resultan más elevadas.

El fenómeno de la carbonatación que se da en algunos materiales supone la reacción del anhídrido carbónico del aire (en presencia de humedad o en forma líquida de ácido carbónico) con los componentes alcalinos

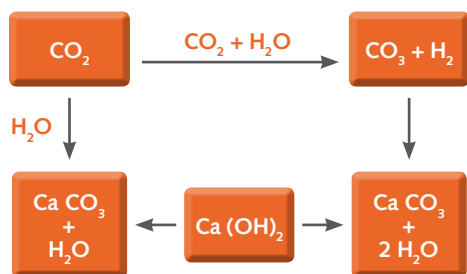
(básicos) de estos; componentes que, en el caso que nos ocupa, se encuentran en la fase ya hidratada del cemento, y que resultan de la hidratación de los componentes del clinker. Así, en el proceso de hidratación de un cemento Portland, la combinación de los grupos puros de silicatos (SC_2 y SC_3) y de aluminatos (AC_3 y FAC_4) con agua, produce (aparte de hidrosilicatos e hidroaluminatos) hidróxido de calcio $-\text{Ca}(\text{OH})_2-$, denominado también Portlandita, un compuesto que, junto con álcalis de sodio y potasio aportados por las arcillas, será el máximo responsable de la elevada alcalinidad (basicidad) de la pasta. Efectivamente, la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ procedente de la hidrólisis del cemento puede llegar hasta el 25% del peso del cemento empleado⁽¹⁾, confiriendo así un elevado carácter básico o alcalino ($\text{pH} > 12$) a las pastas, morteros u hormigones. Los hormigones confeccionados con estos cementos poseerán esta elevada alcalinidad, la cual proporcionará un ambiente protector frente al medio exterior a las armaduras existentes, dotándolas de una capa de óxido pasivante sobre las mismas.

El CO_2 del aire puede penetrar a través de los poros del hormigón y reaccionar con el hidróxido cálcico del cemento produciéndose un cambio en la basicidad del material al combinarse tales elementos y formarse carbonato cálcico. Se producirá una reducción del valor del pH hasta alcanzar valores mínimos de basicidad ($\text{pH} < 9$), desapareciendo la protección que el medio alcalino referido ofrecía a las armaduras. Desaparecida



Dos imágenes del forjado de piso de un patio descubierto en las que se aprecian los efectos de la carbonatación y la aluminosilicosis.

la capa pasivante sobre el acero, “puede” iniciarse el proceso de corrosión si existen factores favorecedores para ello. Tenemos, pues, los dos elementos básicos que desarrollarán, en presencia de humedad y mediante su combinación química, el proceso de carbonatación de un cemento tipo Portland o, lo que es lo mismo, la formación en el seno del hormigón de carbonato cálcico. Estos son el anhídrido carbónico y el hidróxido de calcio.



Así, el proceso de carbonatación del hormigón se producirá desde su superficie hacia el interior de la pieza hormigonada, penetrando a través de los poros hasta alcanzar a las armaduras (avance del frente de carbonatación). Cuanto mayor sea la porosidad del hormigón mayor será el avance del frente de carbonatación y mayor la pérdida de alcalinidad, sobre todo en las capas más superficiales que, precisamente, son aquellas donde se encuentran las armaduras⁽²⁾. Este avance del frente de carbonatación hacia el interior del hormigón se produce cada vez de forma más lenta, hasta detenerse, dado que el carbonato cálcico (poco soluble) formado en las capas externas del hormigón se descompone en bicarbonato cálcico

(soluble) al continuar en medio húmedo y en presencia de CO_2 :



La solubilidad del bicarbonato cálcico producirá la precipitación parcial de carbonato cálcico (al ser la reacción reversible) cuando el agua y el anhídrido carbónico tiendan a migrar hacia el exterior en periodos de secado colmatándose así los poros del hormigón con el paso del tiempo y deteniéndose el avance del frente de carbonatación.

CARBONATACIÓN DE CEMENTO ALUMINOSO

Desde un principio, los materiales que constituyen el crudo del cemento aluminoso son diferentes: si bien siguen participando las calizas, las arcillas desaparecen en favor de las bauxitas, aportando un alto contenido de óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3). El crudo del cemento aluminoso se somete a fusión (cemento fundido), obteniéndose un líquido que se deposita en lingoteras donde, una vez enfriado y solidificado (clinker), pasa a ser pulverizado (cemento). No se añade yeso en el proceso de fabricación y, por tanto, no contiene sulfatos. Estos cementos poseen un endurecimiento muy rápido, de tal forma que pueden adquirir la resistencia requerida en cuestión de horas frente a los 28 días que necesitaría un cemento Portland; de ahí que resulte adecuado para el hormigonado de piezas prefabricadas armadas, las cuales, en poco tiempo, pueden ser desencofradas o desmoldadas y puestas en uso. Mientras en un cemento Portland la composición mineralógica mayoritaria la constituían la cal y la sílice (óxi-

dos de calcio –60%– y de silicio –20%–), en el cemento aluminoso la constituyen la alúmina y la cal (óxidos de aluminio –45%– y de calcio –40%–). La norma UNE 196-2:1996 establece un contenido de alúmina comprendido entre el 35% y el 58% en masa para los cementos de aluminato de calcio⁽³⁾. Actualmente (según RC-08), se denomina a los cementos aluminosos como cementos de aluminato de calcio (CAC). Si en el cemento Portland la composición química del clinker está constituida por silicatos cálcicos en un 80% (SC_3 y SC_2) y aluminatos (AC_3 y FA_4), en el aluminoso está constituida por aluminatos cálcicos (CA , CA_2 , $C_{12}A_7$), siendo el componente mayoritario (70%-80%) y principal responsable de las características de estos cementos el aluminato monocálcico $-CaAl_2O_4-$ (CA en forma simplificada ⁽⁴⁾).

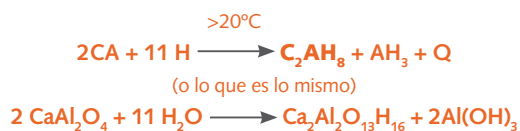
HIDRATACIÓN

En el proceso de hidratación de los cementos aluminosos se producirán unas reacciones entre los aluminatos cálcicos componentes del clinker y el agua de amasado, originando diferentes aluminatos cálcicos hidratados y otros compuestos hidróxidos, en función de la temperatura y del paso del tiempo.

En este proceso, resultan de sumo interés las relaciones entre los elementos del sistema ternario C-A-H (calcio-aluminio-agua) como principales intervinientes en el proceso de hidratación, donde no todos los compuestos resultantes serán estables a la temperatura ambiente. Así, atendiendo al principal componente del cemento aluminoso, el aluminato monocálcico (CA), la reacción de hidratación a temperaturas habituales (inferiores a 15°C / 20°C) producirá un aluminato cálcico decahidratado:



A partir del aluminato monocálcico, con un ligero aumento de temperatura, también se formará un aluminato cálcico octo-hidratado, más hidróxido de aluminio:



HIDRATACIÓN DEL SILICATO BICÁLCICO

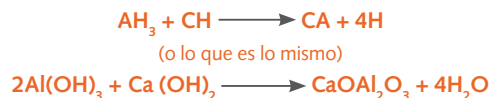
Otro de sus componentes minoritarios, el silicato bicálcico $-SC_2-$, liberará hidróxido de calcio durante la hidratación en pequeñas cantidades, al igual que lo hace en la hidratación del cemento Portland, dando Tobermorita (bisilicato tricálcico) más Portlandita (hi-

dróxido de calcio), según se muestra en las siguientes expresiones:



Durante su hidratación, los cementos de aluminato de calcio producen hidróxido de calcio $-Ca(OH)_2-$ por la combinación del silicato bicálcico (belita) que aparece en su clinker con el agua de amasado (al igual que sucede en un cemento Portland). Por tanto, y como ocurre en un cemento Portland, esta pequeña cantidad de hidróxido de calcio permitiría suponer un ambiente alcalino (protector de las armaduras) en el seno del hormigón confeccionado con un cemento aluminoso.

No obstante, en la hidratación del cemento aluminoso, como se vio anteriormente, también se produce (y de forma mayoritaria) hidróxido de aluminio Al(OH)_3 procedente de la hidratación de los aluminatos; hidróxido de aluminio que se combinará con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del silicato bicálcico de forma tal que este último no llegará a aparecer como fase final de un hormigón aluminoso endurecido⁽⁵⁾.

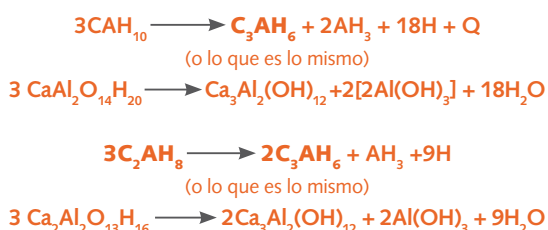


Se produce así la neutralización de ambos elementos, confiriendo un carácter menos básico al hormigón confeccionado con cemento aluminoso, con lo cual cabría esperar que este no ejerciera la misma misión protectora sobre las armaduras que la que desempeña un hormigón confeccionado con cemento Portland, rico en Ca(OH)_2 . A pesar de esta circunstancia, la reducción del carácter básico que experimenta un hormigón confeccionado con cemento aluminoso no resultará determinante en los procesos de degradación de las armaduras que pudieran ser favorecidos por los procesos de carbonatación. El pH de una pasta de cemento aluminoso se establece en torno a un valor de 11 frente al pH > 12 de un hormigón confeccionado con cemento Portland, por lo que los valores de pH de un cemento aluminoso y un cemento Portland resultan, en principio, muy similares⁽⁶⁾.

CONVERSIÓN

Los productos de la hidratación formados durante el fraguado inicial, CAH_{10} y C_2AH_8 (aluminato cálcico decahidratado y octohidratado, respectivamente), cristalizan en el sistema hexagonal y son termodinámicamente inestables (metaestables) a temperatura ambiente. Con el paso del tiempo y bajo la influencia de la temperatura, estos hidratos evolucionarán hacia una fase termodinámica-

mente estable, cristalizando en el sistema cúbico y “convirtiéndose” en aluminato cálcico hexahidratado (C_3AH_6), hidrato que, junto al hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$, forman las fases estables del sistema ternario (C-A-H). Este proceso de transformación de los hidratos metaestables se conoce como fenómeno de “conversión” de los aluminatos o reacción de degradación del cemento aluminoso, un proceso natural e inevitable⁽⁷⁾ a través del cual el material confeccionado con cemento aluminoso consigue un estado estable y definitivo. Las reacciones de conversión de los hidratos hexagonales metaestables pueden expresarse como sigue, si bien las reacciones de conversión pueden ser más complejas al existir conversiones entre los propios hidratos hexagonales, de forma que el decahidrato se transforme en octohidrato y éste, a su vez, se transforme en hexahidrato cúbico⁽⁸⁾:

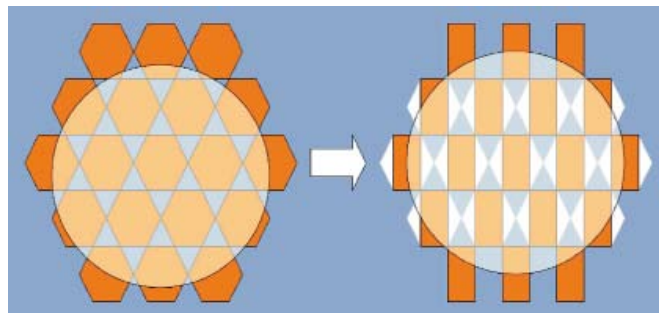


El fenómeno de conversión tiene lugar tras el fraguado, durante el endurecimiento del hormigón, estando relacionado con el paso del tiempo y con la temperatura. A temperaturas bajas, la transformación de los hidratos metaestables es muy lenta y tarda años en completarse. Por el contrario, dicha transformación resulta prácticamente inmediata cuando se alcanzan temperaturas de 50°C. En el esquema siguiente, se sintetiza el proceso de hidratación del cemento aluminoso y los aluminatos hidratados e hidróxidos que se forman, observándose que los

primeros hidratos formados (CAH_{10} –decahidrato– y C_2AH_8 –octohidrato–) no resultan estables y evolucionan, en función de la temperatura de hidratación y del tiempo, hacia estados estables como el del hexahidrato C_3AH_6 . La conversión de los aluminatos hexagonales en cúbicos supone un cambio en la estructura cristalina del cemento que se traduce en una reducción de la densidad del material y una disminución en el volumen de los cristales, a la vez que un aumento de la porosidad (que puede llegar al 20%⁽⁹⁾) y de la permeabilidad del material, lo que lleva consigo una disminución de la resistencia del hormigón y una mayor vulnerabilidad de las armaduras frente a agentes agresivos externos. La relajación de la microestructura del hormigón afectará al tensado de las posibles armaduras insertas en él.

GRÁFICO CRISTALES HEXAGONALES

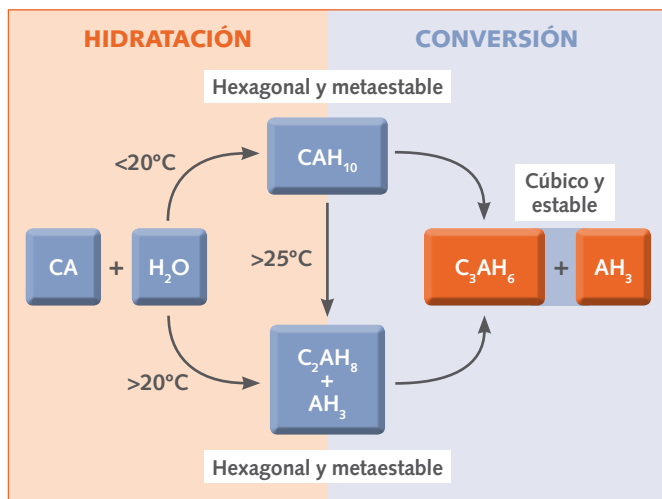
Conversión de los cristales hexagonales de los aluminatos hidratados metaestables al sistema cristalino cúbico (estable): aumento de la porosidad, disminución de resistencias, pérdidas de tensado y mayor vulnerabilidad de las armaduras frente a agentes agresivos externos.



CARBONATACIÓN DEL CEMENTO ALUMINOSO

Las reacciones de carbonatación que se producen en las pastas de cemento Portland son diferentes a las que se producen en la carbonatación de las pastas confeccionadas con cemento aluminoso. Así, en las primeras se produce la pérdida de hidróxido de calcio $-Ca(OH)-$ (principal responsable de la basicidad de la pasta y por lo tanto del ambiente protector que rodea a las armaduras) en favor de la aparición de carbonato cálcico. La presencia o no de este hidróxido de calcio condicionará por lo tanto el pH de la mezcla y el nivel de protección alcalina que ésta proporcione a las armaduras. Las reacciones de carbonatación de los cementos aluminosos afectan a los aluminatos cálcicos hidratados (hexagonales y cúbicos), pero en los productos finales de estas reacciones, al margen de carbonato cálcico, siempre se formará hidróxido de aluminio, por lo que a pesar de los procesos de carbonatación no se producirán variaciones importantes en el pH de los hormigones confeccionados con este tipo de cemento⁽¹⁰⁾.

PROCESO DE HIDRATACIÓN DE CEMENTO ALUMINOSO



Por otro lado, la presencia de álcalis en el cemento aluminoso, aunque muy escasa, inicialmente también contribuye al carácter básico del mismo, permaneciendo éstos en la fase acuosa del cemento tras la carbonatación además de la ya referida producción de hidróxido de aluminio, lo que significa el mantenimiento de valores de pH aceptables⁽¹¹⁾.

Aun así, la reserva alcalina y el pH inicial de las pastas de cemento aluminoso son ligeramente menores que en el cemento Portland y, por lo tanto, cuando se carbonatan, el proceso discurrirá con mayor rapidez que en el caso del Portland, siendo necesarias menores concentraciones de CO₂.

Las reacciones de carbonatación de los aluminatos de calcio hidratados (hexagonales y cúbicos), pueden expresarse, en general, como sigue:



(o bien, para cada una de las fases hidratadas):



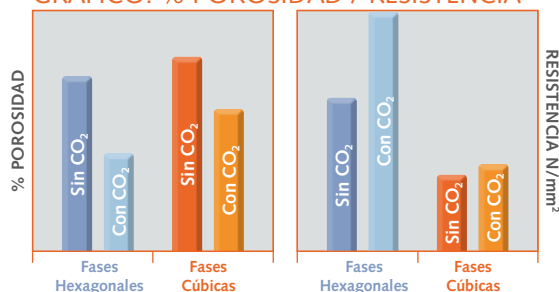
La carbonatación genera, en principio, una reducción de la porosidad del material debido a la precipitación en los poros existentes de los productos originados en la reacción, contribuyendo igualmente a un ligero aumento de resistencia.

Las pastas en las que los procesos de conversión no han avanzado (contenido mayoritario de aluminatos cálcicos hidratados hexagonales), se carbonatan a mayor velocidad que aquellas en las que se han producido los procesos de conversión (presencia de aluminatos cálcicos hidratados cúbicos). La inestabilidad de las fases metaestables y su menor simetría cristalina, así como la mayor cantidad de agua que se desprende en las reacciones de carbonatación (según se observa en las fórmulas anteriores), ocasiona que frente a las fases cúbicas, sea en estas fases hexagonales en las que el CO₂ pueda disolverse con mayor facilidad y favorecer los procesos de carbonatación⁽¹²⁾.

No obstante, el elevado porcentaje de porosidad que obtiene el hormigón tras el proceso de conversión, permitirá el avance del frente de carbonatación hasta alcanzar mayores profundidades en la masa afectada, proceso que puede llegar a carbonatar la totalidad de la masa de hormigón y suponer la pérdida de los hidratos cúbicos (en los cuales se producirá la sustitución paulatina de dos, cuatro o seis moléculas de agua por una, dos o tres de CO₂), hasta obtener como fase final de la carbonatación carbonato cálcico e hidróxido de aluminio.

En los gráficos que siguen se expone una representación gráfica de los efectos de la carbonatación sobre la porosidad y la resistencia.

GRÁFICO: % POROSIDAD / RESISTENCIA



De los gráficos anteriores puede extraerse que en las pastas de cemento aluminoso el porcentaje de porosidad aumenta tras la conversión (como ya se comentó en el anterior apartado nº 2) y que a su vez, disminuye la resistencia. Cuando las fases hidratadas (antes o después de la conversión) se carbonatan, se reduce el porcentaje de porosidad (de por sí elevado tras los procesos de conversión) y aumenta la resistencia (de por sí reducida tras los procesos de conversión aunque posiblemente aceptable a efectos de compresiones).

Por lo tanto, se deduce que el proceso de carbonatación de un cemento aluminoso proporcionará una reducción del porcentaje de porosidad al hormigón elaborado con este tipo de cemento y un aumento de su resistencia, aunque sus efectos serán despreciables cuando la porosidad sea muy elevada tras los procesos de conversión. Al contrario de lo que ocurriría en la carbonatación de un cemento tipo Portland, la carbonatación en un cemento aluminoso puede alcanzar a la totalidad de la masa.

Si se considera que la carbonatación en el cemento aluminoso no reduce significativamente el pH del material y no afecta por tanto de forma significativa al ambiente alcalino protector de las armaduras, ha de concluirse que, en sí misma, la carbonatación no resulta un factor que incida, al menos

directamente y de forma principal, en el proceso de deterioro estructural.

Al igual que ocurriría en un hormigón de base Portland, podrán detectarse hormigones aluminosos que se encuentren carbonatados cuyas armaduras no estén afectadas por procesos de oxidación y hormigones aluminosos que, sin carbonatar, presenten síntomas de oxidación en sus armaduras.

Para que la carbonatación afecte al estado de conservación de las armaduras, deben darse (ya se trate de un hormigón tipo Portland ya se trate de un hormigón tipo aluminoso) una serie de factores que favorezcan tal reacción: porosidad, estado de fisuración, humedad ambiental, temperatura, concentraciones de CO_2 , tiempo de exposición, presencia de cloruros, espesores de recubrimiento...

En igualdad de condiciones para ambos hormigones, el confeccionado con cemento aluminoso parte con una basicidad menor pero tardará más en perderla en caso de carbonatación, siendo el aspecto negativo más incidente en ese proceso de degradación el gran incremento de porosidad que pudiera presentar, facilitándose así la penetración de los agentes contaminantes externos al interior del hormigón y el inicio de los procesos de corrosión (al margen de otras consideraciones referentes a las pérdidas de resistencia, adherencia y pretensado que se derivan del aumento de porosidad ocasionado en los procesos de conversión).

LA HIDRÓLISIS ALCALINA

Para que los efectos de la carbonatación sobre el hormigón confeccionado con cemento aluminoso resulten ciertamente dañinos para el mismo, ha de darse la presencia de álcalis, tales como el sodio o el potasio. Estos álcalis, solubles en agua, forman hidróxidos que de estar contenidos en el seno del hormigón, saldrán a la superficie del mismo a través de los poros (sin que necesariamente estos poros se deban a los efectos de la conversión) y reaccionaran con el CO_2 atmosférico carbonatándose, formando carbonatos (sódico o potásico) y agua.

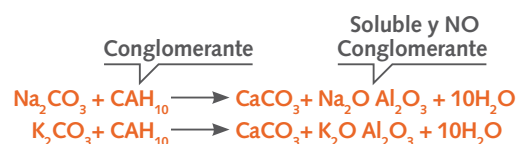
Presencia de álcalis solubles, porosidad del hormigón o del mortero, agua y CO_2 atmosférico, serán los elementos que favorezcan la ocurrencia del fenómeno de hidrólisis alcalina⁽¹³⁾.



Esta carbonatación se produce, por tanto, en la superficie del material, donde los hidróxidos alcalinos carbonatados reaccionarán a su vez con los alumina-

tos cálcicos hidratados del cemento aluminoso, descomponiéndolos para formar el carbonato cálcico y un aluminato alcalino que en ocasiones se manifiestan en forma de mancha oscuras en la superficie, grietas superficiales, descascarillamiento y reblandecimiento de la capa de mortero afectada. Posteriormente la superficie se cubre de un depósito de eflorescencias:

CONGLOMERANTE-SOLUBLE Y NO CONGLOMERANTE



Los aluminatos alcalinos formados son solubles y en presencia de agua volverán a liberar los hidróxidos alcalinos que iniciaron la reacción de carbonatación, volviendo a comenzar de nuevo el ciclo destructivo de los aluminatos de calcio hidratados que al fin y al cabo forman y confieren las propiedades cementantes del cemento aluminoso.



La descomposición de los componentes básicos del cemento se inicia en la superficie del elemento afectado e irá avanzando hacia el interior de la masa del elemento afectado.

Puede entenderse, por tanto, que se trata de una carbonatación del cemento aluminoso en presencia de álcalis (a valores elevados de pH), la cual se constituye en un ciclo de destrucción total del hormigón al disminuir la resistencia de la interfase árido-pasta y que se conoce como hidrólisis alcalina.

Los productos finales del ciclo de hidrólisis alcalina son también, al igual que en el caso de la carbonatación en ausencia de álcalis, carbonato cálcico e hidróxido de aluminio.

La proporción de álcalis en el cemento aluminoso es muy reducida, por lo que su participación en estos procesos de carbonatación ha de buscarse en un aporte externo. Por ello, se limita el empleo de aguas y áridos en la confección de cementos aluminosos que puedan aportar álcalis, así como la mezcla de cementos de aluminato de calcio con cementos Portland (que sí los posee) o la reparación de viguetas confeccionadas con hormigón aluminoso utilizando morteros con base de cemento Portland.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), en su Anejo 3º, especifica que no se deberán utilizar áridos que contengan álcalis liberables y particularmente

se debe evitar el empleo de los graníticos, esquistosos, micáceos y feldespáticos. Igualmente especifica que el cemento de aluminato de calcio, cuando su uso sea justificable, se puede utilizar en obras y elementos prefabricados, de hormigón en masa o armado no estructural y no resulta indicado para hormigón armado estructural. En el esquema inferior se representa el ciclo de la hidrólisis (o carbonatación) alcalina.

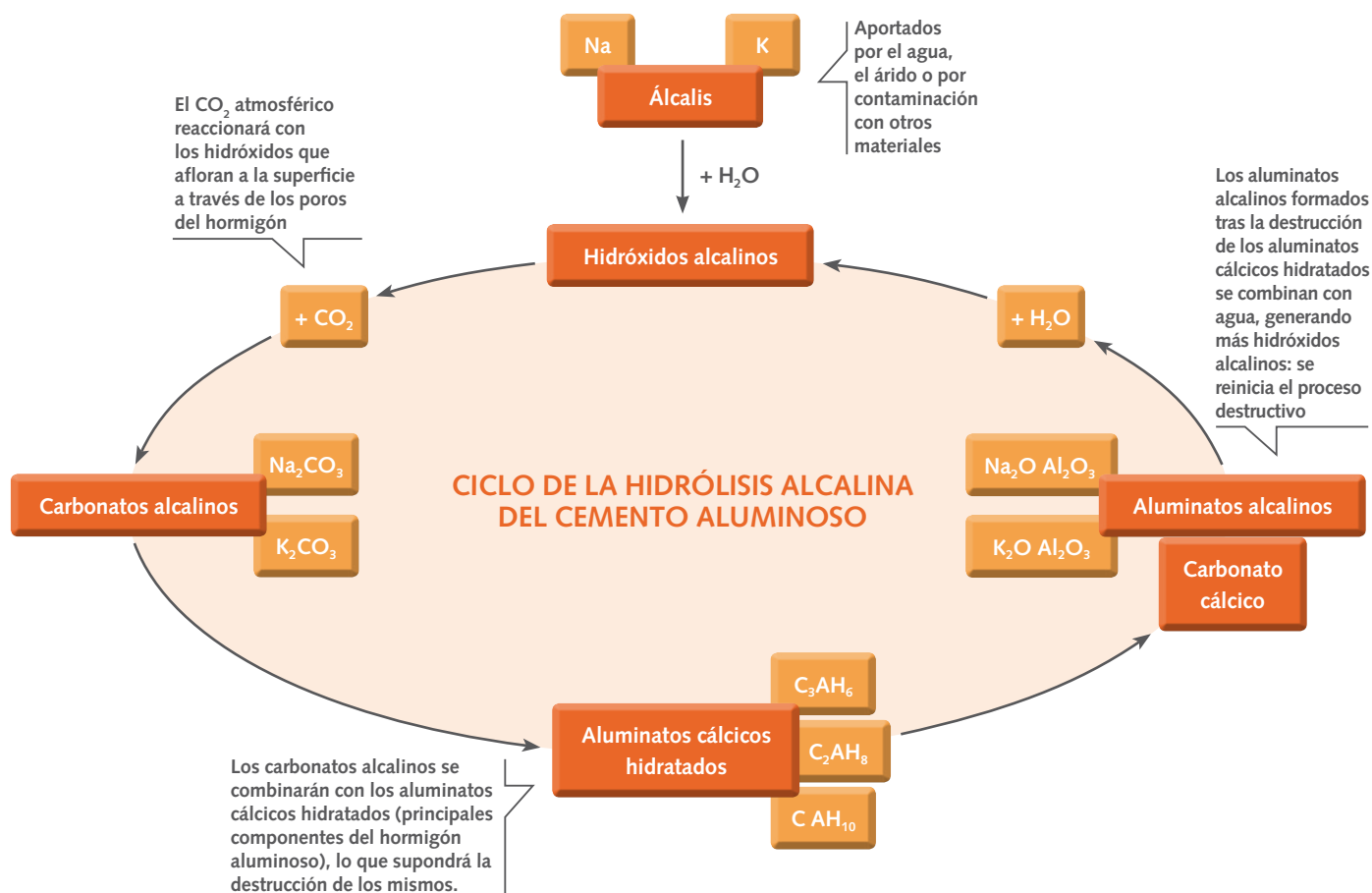
DISCUSIÓN

Durante la hidratación del cemento aluminoso se obtienen productos hidratados como resultado de la combinación del principal componente del cemento aluminoso (aluminato monocálcico) con el agua. Estos productos son los aluminatos cálcicos hidratados, los cuales cristalizan (a baja temperatura) en el sistema hexagonal y son metaestables. Con el paso del tiempo y el incremento de las temperaturas, estos hidratos hexagonales tienden a evolucionar indefectiblemente hacia fases estables cristalinas, dando origen a los aluminatos cálcicos hidratados que cristalizan en el sistema cúbico. Este

proceso, en el que los componentes hidratados del cemento (máximos responsables de las propiedades del mismo), pasan de la fase cristalina hexagonal (metaestable) a la fase cristalina cúbica (estable), es el que se conoce como conversión.

La conversión de los aluminatos hexagonales a cúbicos origina una disminución de la densidad de la pasta y un aumento importante del porcentaje de porosidad, lo que conlleva en sí mismo una disminución en la adherencia de las barras contenidas en el hormigón aluminoso y una caída de la resistencia, además de presentar vías francas de penetración hacia el interior del elemento para los agentes externos perjudiciales.

Los hormigones confeccionados con cemento aluminoso poseen una basicidad (pH) inicial ligeramente inferior a la de los hormigones confeccionados con cemento Portland, debido principalmente a la carencia en los primeros de hidróxido de calcio. Ese carácter básico más reducido confiere una menor pasivación de las armaduras (debido al menor potencial alcalino del cemento), lo que junto al ele-



vado porcentaje de porosidad que adquiere tras los procesos de conversión (sin olvidar la influencia en la porosidad que puede tener la relación agua cemento y las condiciones de curado), permite la carbonatación del hormigón aluminoso y el ataque de agentes externos que penetran a través de los poros. La capa pasivante se ve muy interrumpida por el tamaño y número de los poros.

No obstante, la carbonatación del hormigón aluminoso, a pesar de causar una disminución del pH de la masa y producirse con mayor rapidez, no incide de forma inicial y definitiva en los procesos de alteración estructural de los elementos con este confectionado, pudiendo establecerse que los elementos afectados, en cuanto a la carbonatación se refiere, no se encuentran en condiciones más o menos diferentes a las que se encontraría un hormigón confectionado con cemento Portland. No obstante, los efectos derivados de la conversión (principalmente la porosidad y la disminución de la densidad del hormigón) sí resultan comprometedores para la durabilidad estructural.

Nos encontramos pues ante un hormigón que ha

carbonatación significativa en los que las armaduras aparezcan oxidadas.

De hecho, los principales elementos estructurales que se verán afectados por procesos de corrosión serán aquellos que se sitúen en forjados expuestos a determinadas condiciones de humedad y temperatura (forjados de cubierta, forjados de patios, cocinas, en contacto con instalaciones de saneamiento, etcétera), entrando en juego los factores que habitualmente se entienden como favorecedores de los procesos de oxidación: porosidad, grado de fisuración de la pieza, humedad ambiental, concentraciones de CO_2 , tiempo de exposición, espesores de recubrimiento,...

La conjunción de estos factores ocasionará la oxidación y exfoliación de las barras de armado, favoreciéndose aún más la falta de adherencia en el sistema armado-hormigón (situación especialmente comprometida en el caso de los pretensados) y el aumento de volumen de la sección inicial de los aceros con la consiguiente fisuración longitudinal en el caso de las viguetas (elementos que normalmente presentan escasos espesores de recubrimiento) y la consecuente



La carbonatación de un material resulta de una “incorporación extra” de carbono a su composición. La relación del carbono con ciertos componentes da lugar a reacciones químicas que cambian las propiedades de los materiales



experimentado un importante aumento de porosidad, ante un hormigón cuyas armaduras, frente al medio exterior, no poseen más que la protección que el espesor de recubrimiento del hormigón envolvente les confiera (hormigón con un exceso de porosidad) y ante un hormigón que reduce la adherencia inicial con las armaduras debido al cambio de densidad experimentado tras los procesos de conversión. Las armaduras se encuentran muy expuestas al contacto con el ambiente exterior y, en el caso de darse las condiciones idóneas de temperatura y humedad, resultarán fácilmente vulnerables ante procesos de oxidación.

Al igual que ocurriría en un hormigón de base Portland, para que la carbonatación afecte al estado de conservación de las armaduras, deben darse una serie de factores que favorezcan tal reacción: porosidad, estado de fisuración, humedad ambiental, temperatura, concentraciones de CO_2 , tiempo de exposición, presencia de cloruros, espesores de recubrimiento... En caso contrario, y de igual manera, podrán detectarse hormigones aluminosos carbonatados en los que las armaduras no presenten síntomas de oxidación y hormigones aluminosos sin

pérdida de sección de las barras. La fisuración del elemento estructural supondrá a su vez la apertura de nuevos puentes de penetración de humedad, pudiendo resultar que la menos comprometida en esta sucesión de anomalías en el sistema estructural resulte ser la ya también mermada resistencia del hormigón. Si la carbonatación se diera en presencia de álcalis (incorporados a la pasta de cemento aluminosos por los áridos, agua, contactos con cementos Portland o deficiente dosificación de los componentes), el proceso de carbonatación (denominado en este caso hidrólisis alcalina) constituiría un ciclo en el cual, junto a carbonato cálcico, se formarían como productos de la reacción aluminatos alcalinos, lo cual supondría la destrucción de los aluminatos hidratados (hexagonales y cúbicos) del cemento, desapareciendo los principales componentes cementantes del mismo, disminuyendo la resistencia de la interfase árido-pasta y destruyéndose el hormigón.

CONCLUSIÓN

El fenómeno de la carbonatación puede darse tanto en hormigones confectionados con cementos tipo Portland como en los confectionados con cemento

de tipo aluminoso. El hormigón confeccionado con cemento aluminoso se carbonata con mayor facilidad y rapidez que el confeccionado con un cemento Portland, debido a la composición química de sus componentes (menos alcalinos).

No obstante, la carbonatación, en sí misma, no supone una degradación más o menos influyente en la durabilidad estructural de un hormigón confeccionado con cemento aluminoso que la que supondría en un hormigón confeccionado con cemento tipo Portland.

El elevado grado de porosidad y la bajada de densidad que se produce en las pastas de cemento aluminoso tras los procesos de conversión de los compuestos hidratados iniciales, confieren a los elementos estructurales su carácter más vulnerable ante el ataque de agentes externos y suponen su

aspecto más negativo frente a las premisas de durabilidad. Producida ya la carbonatación, y dado el elevado porcentaje de porosidad que pueden alcanzar los hormigones confeccionados con este tipo de cemento, los fenómenos de progresión de la corrosión de las armaduras estarán en función de la presencia de factores favorecedores para que ésta se produzca.

La pérdida de adherencia entre barras de armado y hormigón debida a la disminución de densidad producida tras los fenómenos de conversión así como la pérdida de tensado en elementos de la estructura horizontal (viguetas), constituyen, junto con el mayor o menor grado de corrosión de las armaduras, los aspectos derivados de la degradación del cemento aluminoso más determinantes en la estabilidad estructural.

NOTAS

(1) Cfr. Goma, F. *El cemento Portland y otros aglomerantes*. Editores Técnicos Asociados. Barcelona, 1979. Pág. 175

(2) Cfr. Sirvent Casanova, I. *Tecnología y terapéutica del hormigón armado (parte 1ª)*. ITC. Barcelona, 1977.

(3) Real Decreto 956/2008, de 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08). *Boletín Oficial del Estado*, 19 de junio de 2008, núm. 148. Pág. 27794.

(4) Desde los estudios sobre la química de los cementos realizados por Rankin y Wright en 1915, en los que proponen el uso de nomenclaturas simplificadas para la formulación de las fases mineralógicas del cemento, es de uso generalmente aceptado el empleo de las mismas. Así, CA es CaAl_2O_4 ; H es H_2O ; CH es $\text{Ca}(\text{OH})_2$; AH₃ es $2\text{Al}(\text{OH})_3$; CAH₁₀ es $\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_{20}$; C₂AH₈ es $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_{16}$; C₃AH₆ es $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$; C₂S (silicato bicálcico) es $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$; C₃S (silicato tricálcico) es $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$; C₃A (aluminato tricálcico) es $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$; C₄AF (ferro-aluminato tetracálcico) es $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$; C es CaO; A es Al_2O_3 ; S es SiO_2 ; F es Fe_2O_3 ; f es FeO.

(5) Álvarez Colomer, J. J.; Medina de la Rosa, E. *La aluminosis: la corrosión del hormigón*. Centro de la Cultura Popular Canaria, 1999. Pág. 28.

(6) Chinchón Yepes, S.; Sanjuán Barbudo, M. A. *El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2008. Pág. 25.

(7) Cfr. George, C. M., Lafarge Fondu International; Montgomery, R. G. J., Lafarge Coppe Recherche. USA. *Calcium aluminat cement concrete: durability and conversion. A fresh look at an old subset. [Hormigón de cemento aluminoso: durabilidad y conversión. Un nuevo punto de vista*

sobre un tema antiguo]. Materiales de construcción, Vol. 42, nº 228, octubre/noviembre/diciembre, 1992. Págs. 33-49.

(8) El octohidrato puede proceder tanto de la hidratación del monoaluminato cálcico (CA) como de la transformación del decahidrato: $2\text{CAH}_{10} - 9\text{H} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{AH}_8 + \text{AH}_3$ (o lo que es lo mismo) $2\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_{20} - 9\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_{16} + 2\text{Al}(\text{OH})_3$.

(9) Alegre, V.; Antonio, T.; Carrasco, E.; Terzán, J. *Aproximación a las pérdidas de pretensado en viguetas de cemento aluminoso*. Hormigón y Acero. Nº 233, 2004. Págs. 47-53.

(10) Chinchón Yepes, S.; Sanjuán Barbudo, M. A. *El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2008. Págs. 24, 33.

(11) García Alcocel, E. M. *Estudio del efecto de las condiciones de curado sobre la mineralogía y características resistentes en morteros de cemento aluminoso*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, 1997. En la revisión bibliográfica de esta tesis, la autora se refiere a los trabajos de C. Andrade et al. sobre Corrosión de armaduras en contacto con cemento aluminoso y su evaluación en términos de vida residual. I Congr. El cas dels sostres. Experiencies i perspectives. Barcelona, 1995.

(12) Fernández-Carrasco, L.; et al. *Carbonatación de pastas de cemento de aluminato de calcio*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Materiales de construcción, Vol. 51, nº 263-264, julio-septiembre/octubre-diciembre, 2001.

(13) Fernández-Carrasco, L., et al. *Nuevos avances en la carbonatación del cemento aluminoso. Hidrólisis alcalina*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Materiales de construcción, Vol. 49, nº 253, enero/febrero/marzo, 1999.